

---

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt201.03.049>

UDC 519.688

**ВОЛКОВ О.Є.,**

зав. відд. інтелектуального управління

e-mail: alexvolk@ukr.net ORCID: 0000-0002-5418-6723

**ПАВЛОВА С.В.,** д-р техн. наук, доцент,

голов. наук. співроб. відд. інтелектуального управління,

e-mail: dep185@irtc.org.ua ORCID: 0000-0003-4012-9821

**СИМАХІН В.М.,** аспірант,

молодш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

e-mail: thevladsima@gmail.com ORCID: 0000-0003-4497-0925

**СЕМЕНОГ Р.В.,** аспірант,

молодш. наук. співроб. відд. інтелектуального управління

e-mail: ruslansemenog20@gmail.com ORCID: 0000-0002-6714-0644

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних

технологій та систем НАН України та МОН України,

пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

---

## **КОМПЛЕКС МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ КОНФЛІКТНИХ СИТУАЦІЙ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ У МАСШТАБІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**

---

***Вступ.** Моделювання польотів повітряних кораблів (ПК) має багато вирішених та відкритих завдань. Розвиток сучасної авіації неможливий без якісних засобів моделювання, а кожна нова розробка, яку пропонують використовувати, повинна бути ретельно протестована. Завдання попередження конфліктів ПК в реальному часі є одним з ключових серед проблем авіації, отже потребує методів розв'язання та засобів для моделювання і тестування.*

***Мета статті** — проаналізувати методи визначення та розв'язання конфліктних ситуацій ПК, розробити програмний комплекс для моделювання динамічних конфліктних ситуацій у масштабі реального часу.*

***Методи.** Програмне розроблення комплексу базується на методах статистичного і імітаційного комп'ютерного моделювання, обчислювальної геометрії та математичного аналізу. Для визначення та розв'язання конфліктних ситуацій використано методи теорії автоматичного керування, навігації та інтелектуального керування.*

***Результати.** Розроблений комплекс моделювання дає змогу оцінити кількісні показники симуляції повітряних кораблів у згенерованому просторі та досліджувати особливості вирішення конфліктних ситуацій. Проведено моделювання переміщення, взаємодії та маневрування ПК. У розв'язанні конфліктних ситуацій запропонована експериментальна система була ефективнішою за чинну систему TCAS II.*

*Тестування розробленого комплексу моделювання та використаних алгоритмів визначення і розв'язання конфліктних ситуацій було проведено з використанням типових дослідних сценаріїв, починаючи від простих конфліктів між двома ПК до гранично складних, за участі в одному конфлікті значної кількості ПК. Основними показниками оптимальності розв'язання конфліктів прийнято кількість та довжину маневрів уникнення конфліктної ситуації за умови різної завантаженості повітряного простору, за різних типів конфліктних ситуацій, пов'язаних з порушеннями норм ешелонування.*

© ВОЛКОВ О.Є., ПАВЛОВА С.В., СИМАХІН В.М., СЕМЕНОГ Р.В. 2020

ISSN 2663-2586 (Online), ISSN 2663-2578 (Print). *Syb. and comp. eng.* 2020. № 3 (201)

**49**

**Висновки.** Отриманий комплекс може застосовуватися для дослідження взаємодії багатьох ПК в динамічному середовищі, розроблення та тестування методів розв'язання конфліктних ситуацій. Модульність комплексу також дає змогу виконувати моделювання інших елементів, таких як системи передачі даних.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, авіація, комп'ютерне моделювання, конфліктна ситуація, повітряний корабель, система.

## **ВСТУП**

Кількість авіаперельотів щороку зростає зі швидкою динамікою. Згідно зі статистикою організації EUROCONTROL, у 2012 році кількість перельотів у європейському повітряному просторі становила 9,5 мільйонів на рік, а у 2018 році — 11 мільйонів. У червні 2019 року було зареєстровано рекордну кількість перельотів на день — більше 37 тисяч, а загальне зростання кількості у першій половині року склало 1,7 % відносно аналогічного тогорічного періоду часу.

Забезпечення безпеки польотів повітряних кораблів (ПК) є основним завданням кожної організації, причетної до обслуговування, організації, виконання чи моніторингу повітряного руху. Координація взаємодії ПК у повітряному та наземному просторах забезпечується автоматизованою роботою багатьох програмних і апаратних систем, а також операціями людського персоналу. За рішенням Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) для польотів ПК з масою більшою за 5700 кг або сертифікованих для перевезення 19 і більше пасажирів, обов'язковим є наявність системи попередження зіткнення TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System) [1]. Однак система має достатню кількість недоліків, серед яких високовартісність та необхідність наявності передавачів на кожному ПК для коректної роботи та обмеженість розв'язання конфліктів лише з використанням вертикального ешелонування. Окрім цього, органи керування повітряним рухом (КПР) можуть автоматично отримувати інформацію про рекомендації з вирішення ситуації зіткнення, випущених TCAS, тільки коли повітряне судно знаходиться у зоні дії режиму опитування Mode-S авіаційного радіолокаційного відповідача або мережі автоматичного спостереження ADS-B (Automatic Dependent Surveillance — Broadcast). В інших випадках диспетчери можуть не знати про рекомендації вирішення таких ситуацій на основі TCAS або навіть надавати суперечливі інструкції (якщо тільки члени КПР явно непоінформовані членами екіпажу про рекомендації, які надано TCAS у ситуації високого навантаження), що може призвести до додаткового збільшення робочого навантаження пілота.

Розроблення та впровадження нових методів попередження зіткнень ПК потребує застосування програмних комплексів для моделювання польотів, які мають змогу конфігурувати параметри ПК, бортові системи та особливості траєкторій та навколишнього середовища.

## **СИСТЕМА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕНЬ TCAS**

Згідно з правилом ІКАО, кожен ПК має бути обладнаним системою попередження зіткнень. Відповідно до рішення Європейської Агенції Авіаційної Безпеки від 2012 року, обов'язковим є використання TCAS II версії 7.1 [2].

Версія TCAS I є першим поколінням системи, що використовувалася до 1989 року і за деяких обставин може бути використана зараз. Вона виконує основні завдання, такі як моніторинг повітряного простору у радіусі 65 км та надання інформації щодо пеленгу і висоти інших ПК у такому радіусі. Також система повідомляє про можливість зіткнення у вигляді «Рекомендації щодо трафіку» (Traffic Advisory, TA). TA попереджають пілота про знаходження ПК в небезпечному радіусі, але не пропонують засобів розв'язання конфлікту. Пілот самостійно або за сприяння наземних диспетчерів вирішує, які дії виконувати. Коли загроза минула, система оповіщає повідомленням «Немає конфлікту».

Оновлена версія TCAS II використовує усі функції TCAS I та, окрім них, має низку вдосконалень. Система пропонує пілотові чіткі голосові інструкції для уникнення небезпеки — «Консультації щодо вирішення» (Resolution Advisory, RA). Запропонована дія може бути коригувальною або превентивною. Коригувальна інструкція передбачає зміну вертикальної швидкості. Використовують повідомлення «Спуск, спуск», «Підйом, підйом» або «Регулювання вертикальної швидкості». Превентивні інструкції попереджають пілотів про необхідність відхилитися від їх поточної вертикальної швидкості, оголошуючи «Відслідковувати вертикальну швидкість» або «Підтримувати вертикальну швидкість, Підтримувати». Перед подачею команд пілотам відбувається синхронізація рекомендацій між системами TCAS II кожного літака-учасника конфліктної ситуації. Отже, якщо одному літаку дають настанову спуститися, іншому зазвичай вказують піднятися, що максимально збільшить відстань між двома літаками. TCAS II одночасно може відстежувати до 30-ти повітряних кораблів і для трьох одночасно видавати команди з розв'язання конфліктної ситуації.

TCAS може взаємодіяти лише з ПК, на яких встановлено активний радіолокаційний відповідач режиму C або S. Кожному ПК, що має радіолокаційний відповідач режиму S, присвоюється унікальний 24-бітний ідентифікатор. Під час взаємодії з літаками система генерує тривимірну мапу у повітряному просторі заданого радіусу. Кожний ПК на мапі характеризується трьома основними показниками: відстанню, висотою та пеленгом. Відстань отримується з затримки часу передачі запиту і відповіді; висоту визначають згідно з повідомленням опитуваного літака; пеленг визначається напрямком знаходження антени. Система визначає, чи є потенційна загроза зіткнення, використовуючи методи екстраполяції цих характеристик на очікуванні майбутні значення.

Під час побудови мапи та обчисленні можливих загроз системи попередження зіткнення враховують об'єм повітряного простору навколо власного ПК. Розмір такого простору залежить від висоти, швидкості і курсу літака, який бере участь в зіткненні. На рисунку 1 надано приклад типового захищеного простору для літака, обладнаного системою TCAS II?

Принцип роботи TCAS II (рис. 1) засновано на визначенні часу польоту до точки найбільшого зближення CPA (Closest Point of Approach) залежно від діапазонів висот (рівень чутливості). У режимі 1-секундного циклу TCAS II відстежує інші повітряні кораблі, запитуючи їхні прийомо-передавачі, а коли перевірка дальності та перевірка висоти дають позитивний результат, TCAS видає попередження про небезпечне зближення TA (Traffic Advisory) а якщо літаки продовжують зближуватися, то екіпаж отримує повідомлення TCAS про необхідність розв'язання конфліктної ситуації RA (Resolution Advisory) і

команду на виконання маневру зниження («Зниження», «Descend») або набору висоти («Набір висоти», «Climb»). Якщо системами TCAS II версії 7.1 оснащено обидва літаки, то вони обмінюються інформацією для запобігання однакових маневрів розходження (рис. 2).

Основною особливістю другої версії TCAS є використання вертикального ешелонування. Це одночасно є і перевагою, і недоліком, оскільки окрім вертикального ешелонування виділяють повздовжнє та бічне. З середини 1990-х років розроблялися концепти третьої та четвертої версії системи TCAS, які б враховували інші методи ешелонування, проте їхнє розроблення було заморожено. Останні розробки в галузі передачі даних поставили під сумнів доцільність використання окремих каналів зв'язку для попередження конфліктів. Технологія ADS-B (Automatic Dependent Surveillance — Broadcast, Автоматичне залежне спостереження — радіомовне) дає змогу визначати положення ПК за допомогою систем супутникової навігації та передавати його через бортові відповідачі [3].

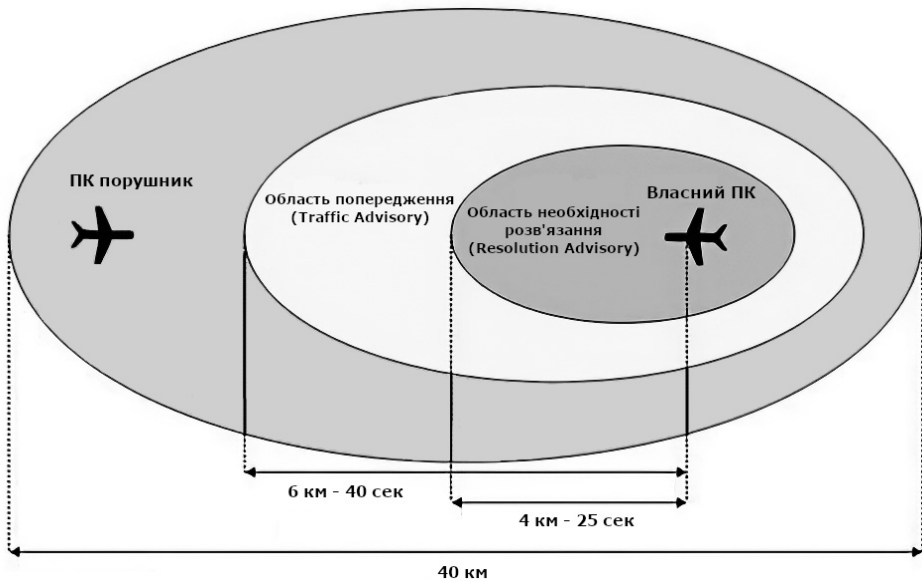


Рис. 1. Приклад захищеного простору для ПК

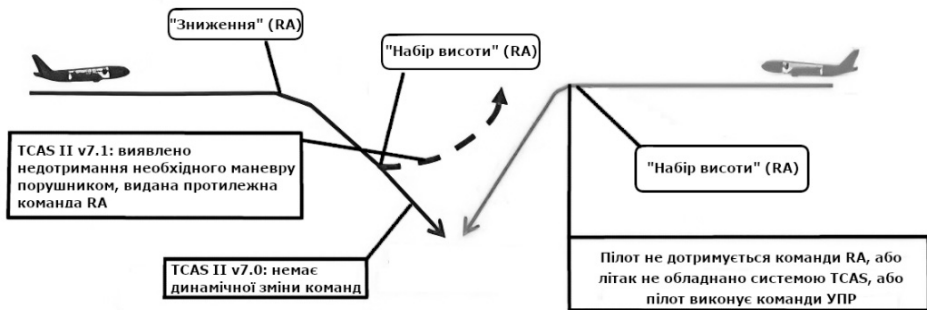


Рис. 2. Схематичне зображення роботи системи TCAS у разі конфлікту двох ПК

## НОРМИ ЕШЕЛОНУВАННЯ ЗГІДНО З ІКАО

Норми ешелонування було введено ІКАО для розподілу ПК у повітряному просторі на встановлені інтервали заданої величини з метою попередження конфліктних ситуацій. Вони поширюються на всі ПК, які мають національні знаки та реєстраційні знаки держав-членів ІКАО. В Україні норми ешелонування було затверджено наказом «Про затвердження Правил ешелонування під час обслуговування повітряного руху» Міністерства транспорту та зв'язку України від 29.09.2010 [4].

**Вертикальним ешелонуванням** називають розосередження повітряних суден на різних рівнях (ешелонах) за висотою. Рівні вертикального ешелонування позначаються аббревіатурою FL (Flight Level), за якою зазначається номер ешелону, що визначається висотою у сотнях футів. Наприклад, FL20 — це рівень на висоті 2000 футів (600 метрів).

Вертикальне ешелонування зазвичай здійснюється у напівкруглій системі ешелонування: для польотів з істинними шляховими кутами від 0 до 179° вибирається непарний десятковий ешелон (10, 30, 50, ..., 490); для польотів з істинними шляховими кутами від 180 до 359° вибирається парний десятковий ешелон (20, 40, ... 500). Мінімум вертикального ешелонування повинен становити:

1) номінально 300 м (1000 футів) — для ешелонів, нижчих за FL290 та номінально 600 м (2000 футів) — для ешелону FL290 та вище, крім наступної умови;

2) 300 м (1000 футів) між ешелонами FL290 та FL410 включно, за умов використання скороченого мінімуму вертикального ешелонування (RVSM, reduce vertical separation minima), та номінально 600 м (2000 футів) вище ешелону FL410.

**Бічне ешелонування** полягає в розподіленні запланованих маршрутів так, щоб відстань між їхніми ділянками ніколи не була меншою за деякі визначені дистанції і розмір встановленого буфера. Відстань між повітряними трасами повинна бути не меншою за 50 км. У разі польоту поза трасою бічна відстань між ПК, які летять в одному або протилежному напрямках, не повинна бути меншою за 10 км. Мінімальна дистанція бічного ешелонування у разі розходження в умовах безперервного радіолокаційного контролю згідно з правилами польотів за приладами становить не менше за 20 км.

Точками бічного ешелонування називають точки входу у район з бічною відстанню, меншою за необхідний мінімум, та виходу з нього для треків, які перетинаються. Площина, обмежена точками бічного ешелонування, називається районом конфлікту. Точки бічного ешелонування обчислюють за формулою

$$l = \frac{S_y}{\sin(u)},$$

де  $l$  — відстань від перехрестя до точки бічного ешелонування;  $S_y$  — бічна відстань між лініями шляху, що дорівнює мінімуму бічного ешелонування;  $u$  — кут між лініями шляху. Схему розрахункових точок бічного ешелонування і зони конфлікту зображено на рис. 3.

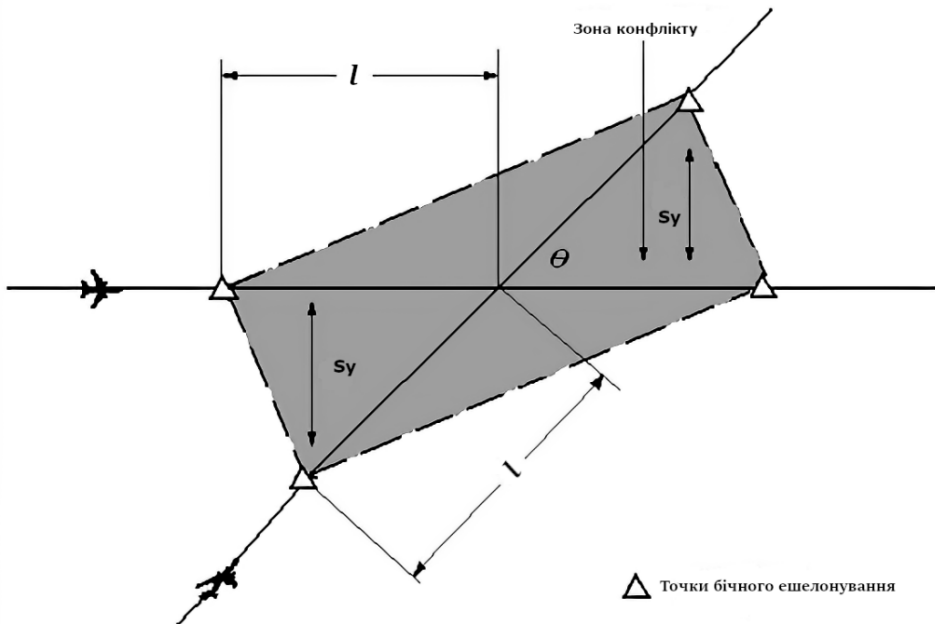


Рис. 3. Точки бічного ешелонування і зони конфлікту

У разі *повздовжнього ешелонування* інтервал між розташуваннями повітряних кораблів ніколи не повинен бути меншим за встановлений мінімум. Повздовжнє ешелонування між ПК, які прямують за попутними або протилежними треками, може бути витримано шляхом застосування керування швидкістю, включаючи використання методу числа Маха. Мінімуми повздовжнього ешелонування можуть базуватися:

- на часі;
- на часі – з використанням методу числа Маха;
- на відстані – з використанням всебічно направлених далекомірних радіомаяків та/або GNSS;
- на відстані – з використанням зональної навігації, з використанням методу числа Маха;
- на відстані – з використанням зональної навігації, у місцях, де встановлені потрібні навігаційні характеристики.

### СТРУКТУРА КОМПЛЕКСУ МОДЕЛЮВАННЯ ПК

Систему для симуляції польотів ПК реалізовано з використанням чотирьох програмних модулів (рис. 4). Більшість модулів є незалежними один від одного та можуть комбінуватися для виконання окремих етапів симуляції.

Модуль генерації задіяно на початковому етапі роботи комплексу моделювання. Він створює базову 3D мапу з ландшафтом, секторами і наземними об'єктами та моделями повітряних кораблів, які розташовуються у створеній мапі. Повітряний простір подано у вигляді графа. Вершинами графа є наземні об'єкти, ребрами — оптимальні траєкторії. Мапа розділяється на сектори чотирьох типів: нейтральна зона; зона, де ПК може взає-

модіяти з наземними об'єктами; зона підвищеної небезпеки та заборонена для польотів зона. Створення мапи є можливим у ручному, частково автоматичному та повністю автоматичному режимах. Генерація моделей ПК відбувається згідно з встановленою кількістю та заданими характеристиками із бази даних.

Початкова генерація траєкторій ПК відбувається за допомогою модуля планування польотів. Також цей модуль є пов'язаним з графом повітряного простору, за допомогою якого вибирає оптимальну початкову траєкторію, базуючись на критеріях відстані, ефективності, часу та інших.

Модуль переміщення виконує основну симуляцію усієї системи, що здійснюється потаково із синхронізацією взаємодії всіх ПК та їхніх окремих елементів. Так, наприклад, обмін повідомленнями між системами TCAS двох ПК займає 1 такт, а взаємодія з наземним диспетчерським центром займає принаймні 10 тактів, оскільки враховується час реакції людського персоналу та обміну голосовою інформацією. Координація взаємодії переміщення виконується за допомогою модулів планування та обчислення. Додатково виконуються обчислення траєкторій руху та за необхідності їх оптимізація.

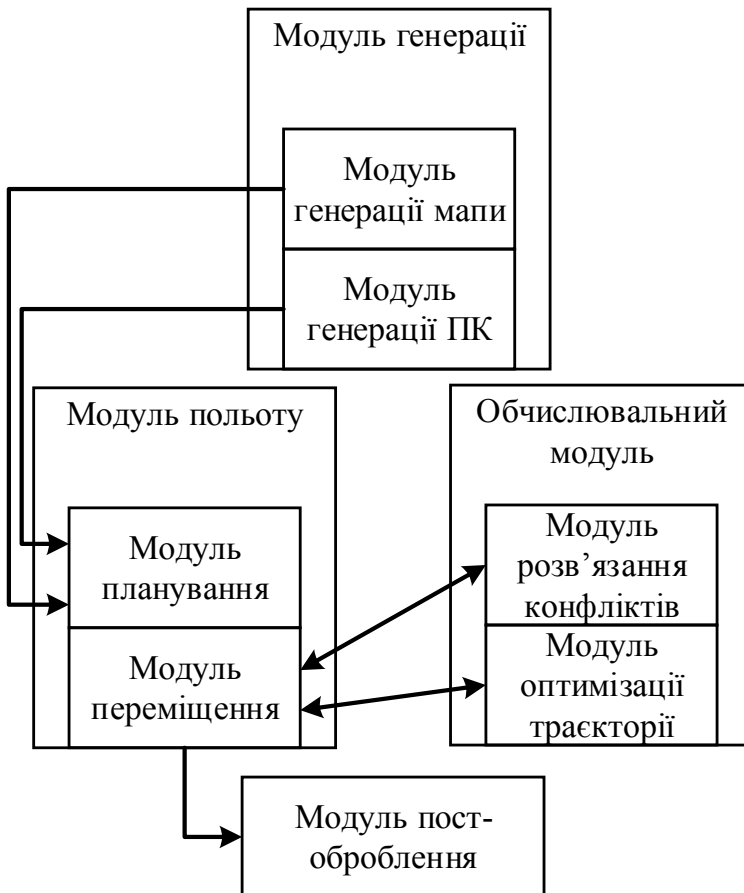


Рис. 4. Організація комплексу моделювання динамічних конфліктів ПК

Для надання користувачу системи інформації про процес та результати роботи використовується графічний інтерфейс. У модуль пост-оброблення постійно надходить необхідна інформація від усіх активних модулів та генерується зображення. За рахунок використання зовнішніх розширень для модуля є можливим адаптувати системи до веб-інтерфейсів, до командного рядка чи до мобільних додатків.

## МОДУЛЬ ГЕНЕРАЦІЇ

Початковим етапом виконання симуляції є створення тривимірного простору. Основна увага приділяється двомірній площині XY, яка містить основні необхідні елементи. У третьому вимірі Z (висота) генеруються лише елементи ландшафту, такі як гірські масиви, та виконується розподіл висот на ешелони до FL920 включно.

Генерація площини XY розпочинається зі створення координат наземних об'єктів: населених пунктів, аеродромів, наземних станцій зв'язку, центрів зон заборонених для польотів та інших. Координати точок генеруються за правилом розподілу Бокса-Мюллера [6]:

$$z_1 = x * \sqrt{\frac{-2 * \ln(R)}{R}}, \quad z_2 = y * \sqrt{\frac{-2 * \ln(R)}{R}},$$

де  $R = x^2 + y^2$ ,  $x$  та  $y$  — незалежні випадкові величини з відрізка  $[-1, 1]$ .

На основі просторового розподілу виконується агрегація та розподіл згенерованих точок за встановленими правилами. Так, наприклад, точки аеродромів не можуть розташовуватися дуже близько одна до одної, не може бути більше двох аеродромів у одному місті, заборонені для польотів зони з більшою вірогідністю розташовуються на відстані від населених пунктів. Залежно від розміру генерованої площини, виконуються декілька циклів розподілу точок для відповідності встановленим правилам та наближенню до закону нормального розподілу.

Для розбиття площини на сектори використовується декомпозиція Вороного з алгоритмом Форчуна [7]. Цей підхід дає змогу отримати сектори, межі яких є рівновіддаленими від вершин графа повітряного простору. Додатково після декомпозиції виконується перевірка на відповідність правилам розбиття секторів.

Моделі ПК створюються відповідно до заданої кількості чи випадковим чином. Під час генерації вони розміщуються в аеропортах чи у повітряному просторі. Для технічних характеристик взято за основу інформацію з відкритих баз даних про 50 найпопулярніших пасажирських та транспортних літаків. Дані зберігаються у форматі CSV (рис. 5). Фізичні показники ПК, які змінюються в польоті, задаються рівняннями відповідних розділів фізики та авіації.



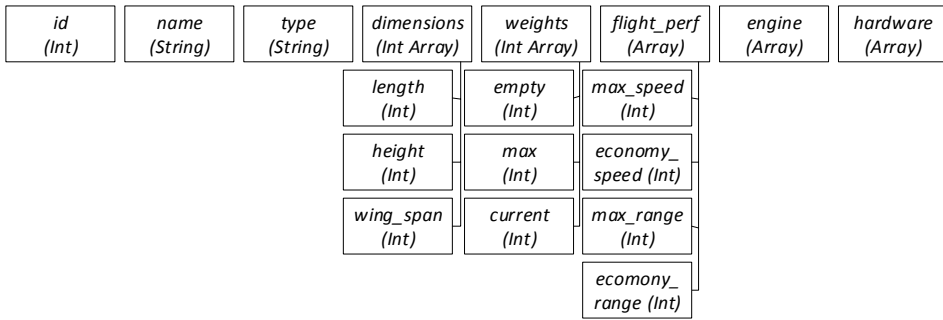


Рис. 5. Надання характеристик ПК в програмному комплексі

### МОДУЛЬ ОБЧИСЛЕННЯ

Модуль обчислення виконує дві основні функції – розв’язання конфліктів ПК та оптимізацію траєкторії для уникнення конфліктів. У якості основного пристрою для виявлення та розв’язання конфліктів ПК використовується система TCAS II. Альтернативно було реалізовано експериментальну систему гарантованого розв’язання динамічних конфліктів повітряних кораблів у масштабі реального часу [8, 9].

Розглянемо принцип роботи модуля обчислення ЕС згідно з алгоритмом, який зображено на рис. 6. Модуль працює циклічно, безперервно отримуючи дані з багатьох джерел свого літака та всіх інших ПК, що знаходяться в певній заданій обмеженій частині простору, передаючи результати обчислень до інших ПК, систем свого ПК і наземних служб та систем. Дані постійно приймаються та обробляються, частина з них за необхідності може зберігатися для використання в наступних інтервалах часу.

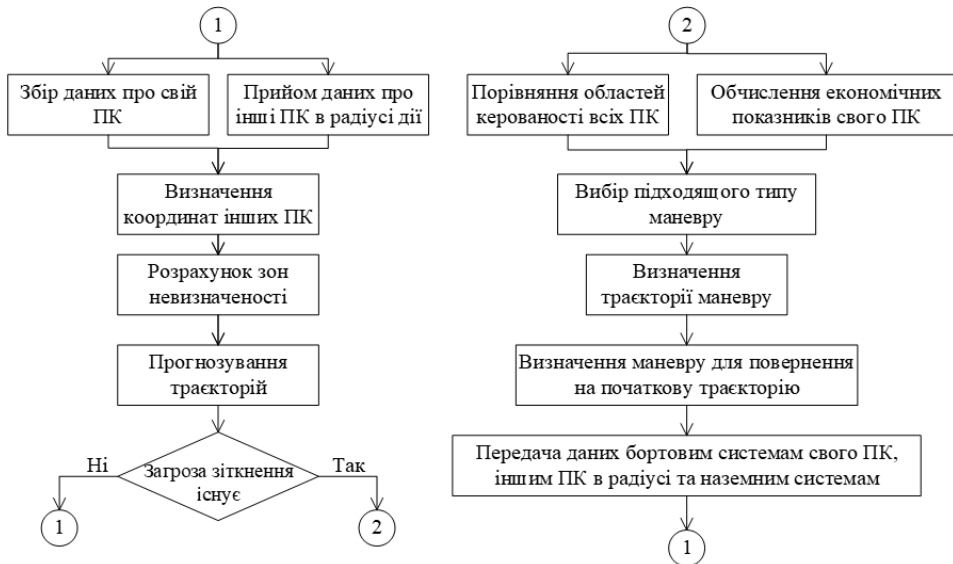


Рис. 6. Алгоритм роботи модуля обчислень

Після прийому та оброблення даних відбувається аналіз загрози зіткнення на основі прогнозів траєкторій руху ПК в заданій зоні, які базуються на координатах, швидкості, прискоренні, курсі та можливих додаткових параметрах математичних моделей руху ПК. Додатково, для визначення координат усіх ПК на просторово-часовій координатній сітці враховується інформація про так звані «зони невизначеності». На основі отриманих даних та прогнозованих траєкторій ПК проводиться аналіз та моделювання для визначення ймовірності загрози зіткнення ПК у заданій області простору. Якщо загроза зіткнення відсутня, підсистема повертається до початкового стану і циклічно продовжує аналіз.

За наявності загрози зіткнення розпочинається розрахунок параметрів маневрування, основним завданням якого є визначення оптимальної траєкторії маневру для уникнення зіткнення. Сукупна інформація про прогнозовані траєкторії використовується для визначення областей керуваності ПК в зоні конфліктної ситуації у кожен момент часу. Додатково враховуються економічні показники власного ПК, а саме зміна маршруту маневру за відстанню та часом, економія палива, зручність перевезення пасажирів і багажу тощо. Ці показники та критерії надалі враховуються в обчисленнях для визначення траєкторій відхилення. На основі інформації, отриманої на попередніх етапах обчислень, вибирається відповідний тип маневру, який найбільше підходить для розв'язання заданої конфліктної ситуації, розраховується траєкторія маневру ухилення та кроки для повернення на початкову траєкторію після ухилення. Кожен з отриманих результатів є вихідною інформацією модуля, яка передається до інших пов'язаних модулів.

Для формування керувальних команд та циклічної роботи цього модуля інформація зберігається у внутрішніх системах свого ПК. За допомогою систем зв'язку та передачі даних модуль передає інформацію про власні маневри та траєкторії іншим ПК у заданій частині простору, а також, за можливості, до наземних систем, таких як диспетчерські пункти, радіолокаційні системи та пілотажно-навігаційні комплекси.

## **ТЕСТУВАННЯ КОМПЛЕКСУ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Процес моделювання зв'язків та властивостей авіаційних систем, елементів та процесів дає змогу оцінити їхній стан, зробити прогноз, прийняти обґрунтоване рішення, перевірити точність і правильність моделі тощо. Статичними складниками моделі виступають ПК, кожен зі своїми сталими фізичними характеристиками та вектором запланованого руху. Динамічним складником моделі є процес функціонування і розвитку статичних елементів, тобто характеристики та показники польоту, траєкторій, що змінюються у часі. Початковими даними для роботи комплексу є:

- кількість ПК, які знаходяться у деякій частині простору;
- кількість наземних об'єктів, які знаходяться у деякій частині простору;
- початкові координати ПК та наземних станцій;
- незмінювані фізичні показники кожного ПК (розміри, вага, пріоритет тощо);
- змінювані фізичні показники кожного ПК (швидкість, висота, запас палива тощо).

Процес моделювання здійснюється з дискретизацією переміщення ПК з певним інтервалом часу за допомогою синхронізації годинника системи з годинниками ПК та наземних станцій. Згідно з початковими координатами та траєкторією руху ПК переміщуються в деякій визначеній тривимірній площині. Кожний ПК у реальному часі, згідно з реалізацією алгоритму передачі даних під час руху, обмінюється інформацією з іншими ПК та виконує прогнозування загрози зіткнення в деякій визначеній зоні. У разі виникнення конфліктної ситуації ПК виконують розрахунок параметрів маневрування та після маневру повертаються на попередню траєкторію.

Розроблений програмний застосунок виконує потактове моделювання за вказаними умовами та початковими параметрами. Основне вікно містить графічне подання мапи зони симуляції у трьох виглядах: Радар (рис. 7), Перегляд за висотою та Мапа. Область у правій частині вікна програми дає змогу переглядати системні повідомлення про виконані дії, маневри та ситуації. У фоновому режимі здійснюється збір даних про числові характеристики кожного об'єкту системи моделювання, які зберігаються у файл. Налаштування початкових умов для простору, ПК та траєкторій є можливим у ручному та автоматичному режимах (рис. 8 а, 8 б).

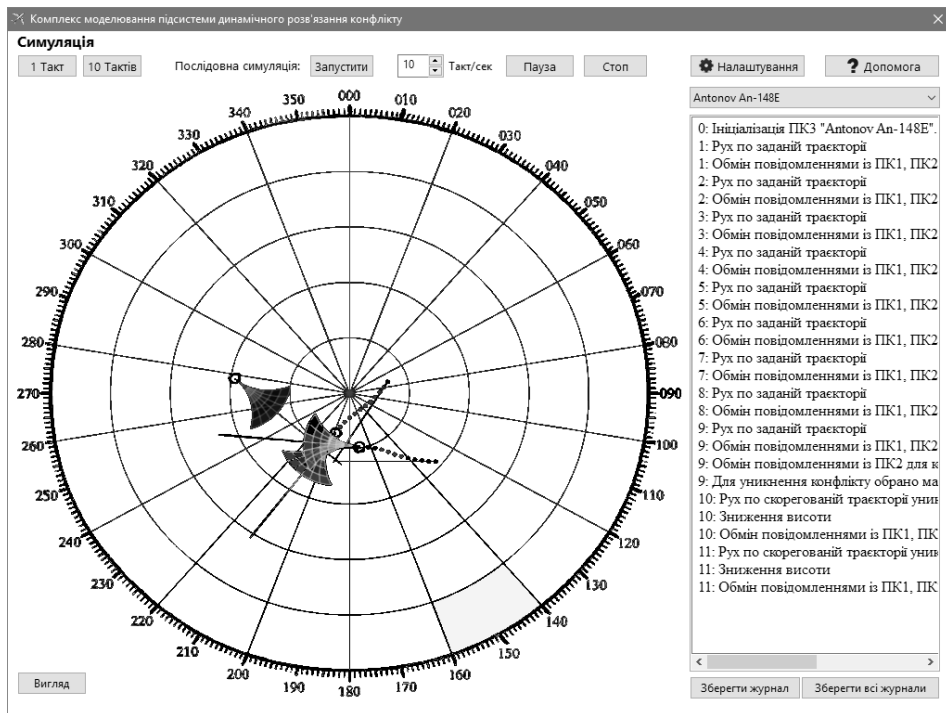


Рис. 7. Графічний інтерфейс розробленого комплекс моделювання

Тестування розробленого комплексу було проведено декількома серіями для виявлення показників загальної завантаженості повітряного простору (Рис. 9а) і його окремих секторів (рис. 9б). На рисунках показано середні значення для серії тестувань за п'яти різних початкових умов, заданих випадковим чином. Вертикальні лінії вказують на допустиме (55 %) та критичне (70 %) значення завантаженості простору. Окрім цього, виконано обчислення залежності кількості та довжини маневрів від завантаженості простору та кількості конфліктних ситуацій (рис. 9в та 9г). Зростання завантаженості простору спричиняє експоненційну залежність кількості та довжини маневрів.

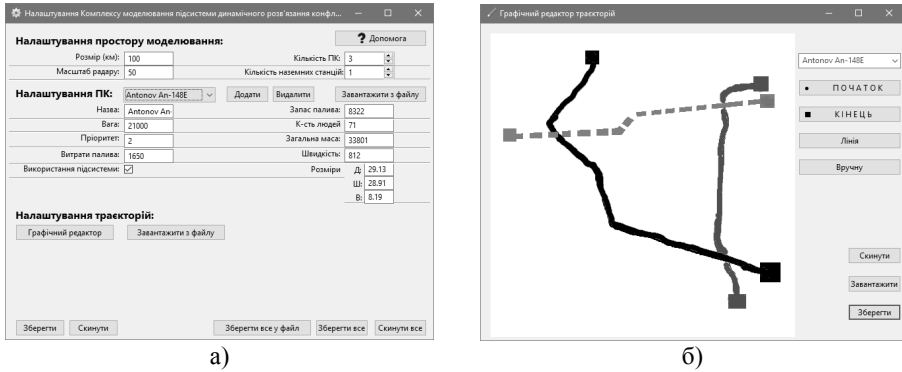


Рис. 8. Графічне вікно налаштування генерації елементів (а) та редактора траєкторії (б)

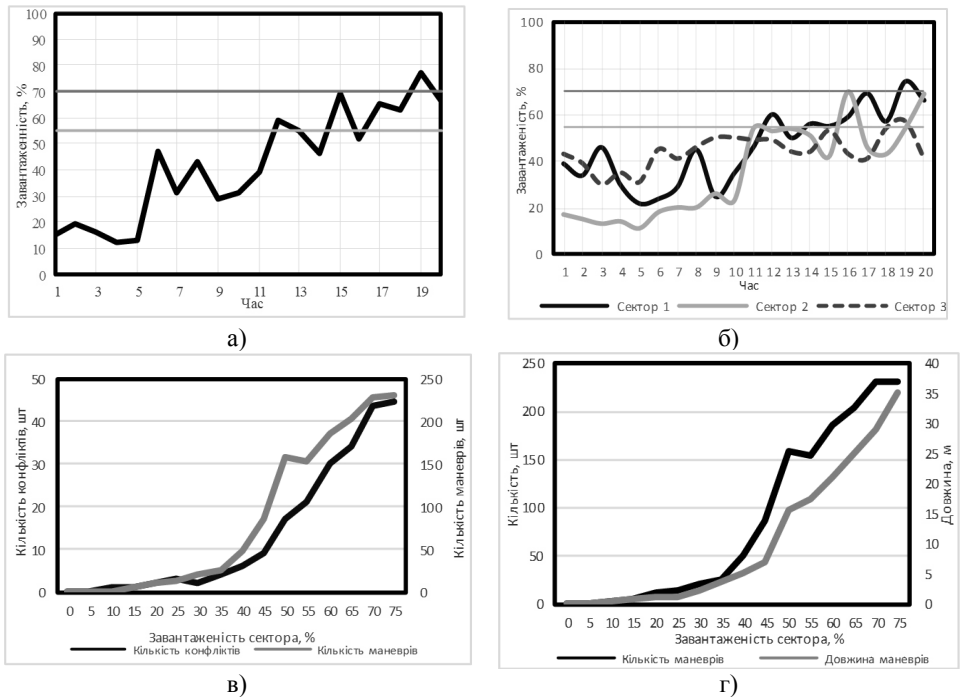
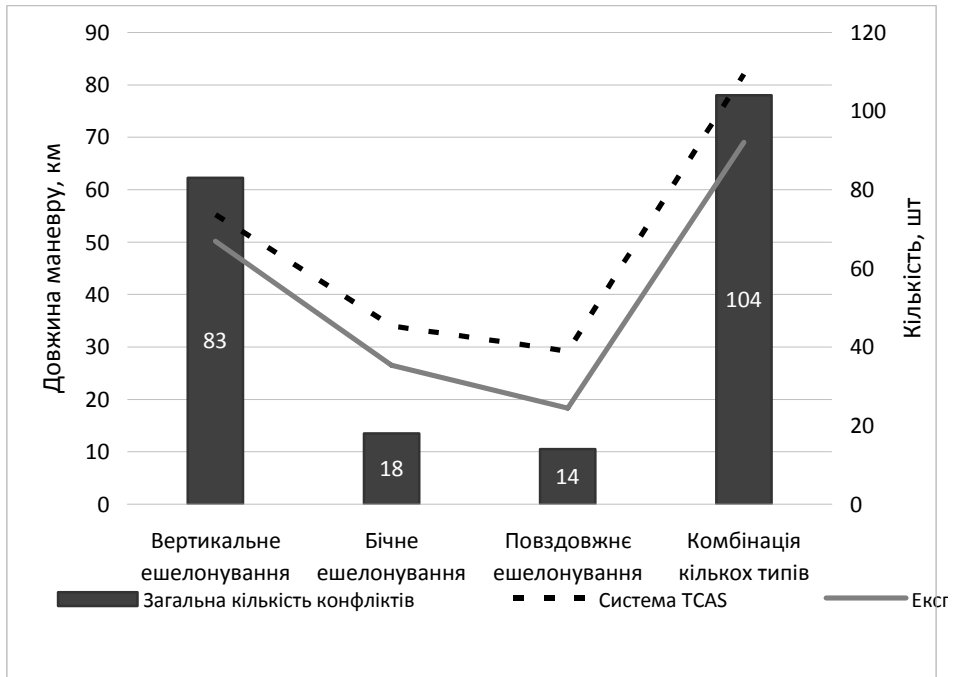


Рис. 9. Результати моделювання конфліктних ситуацій ПК: а) загальна завантаженість простору; б) завантаженість секторів простору; в) кількість конфліктних ситуацій та виконаних маневрів залежно від завантаженості; г) кількість та довжина виконаних маневрів залежно від завантаженості



**Рис. 10.** Порівняльний графік моделювання з використанням експериментальної системи розв'язання конфліктних ситуацій та системи TCAS II

На основі отриманих результатів можна виконувати оцінювання згенерованої моделі та порівняння з іншими аналогічними моделями та з даними реальних польотів. Графіки завантаженості повітряного простору відповідають динаміці показників графіків уникнення конфліктних ситуацій. У разі зростання кількості ПК на одиницю площі виникає більше критичних ситуацій, що в свою чергу спричиняє збільшення обміну повідомленнями між усіма об'єктами в радіусі виникаючих конфліктів. За значної кількості ПК виникає перенавантаження систем розв'язання конфліктних ситуацій та уникнення конфліктів спричиняє утворення нових конфліктів. На рис. 9г показано, що за великої завантаженості утворювалися конфліктні ситуації між багатьма (п'ять та більше) ПК та після виконання маневрів ухилення утворювалися нові конфлікти, які потребували більшої довжини траєкторій маневрування.

Для дослідження якості експериментальної системи (ЕС) гарантованого розв'язання динамічних конфліктів ПК у масштабі реального часу було виконано збір та аналіз даних щодо типів конфліктних ситуацій згідно порушень норм ешелонування та виконано порівняння із чинною системою розв'язання конфліктів TCAS II (рис. 10).

Близько 85 % конфліктів було отримано через порушення норм вертикального ешелонування чи в комбінації кількох типів. Відповідно довжина маневрів у таких конфліктах була значно більшою. Система TCAS гірше розв'язує конфлікти у разі порушення бічного та повздожнього ешелонувань, оскільки вони вирішуються правилами вертикального ешелонування. Натомість ЕС розв'язання конфліктів краще впоралася з розв'язанням конфліктних ситуацій, а її ефективність вища на 18,2 %.

## ВИСНОВКИ

Розвиток сучасної авіації є неможливим без якісних засобів моделювання, а кожна нова розробка, яку пропонується використовувати, повинна бути ретельно протестована. Завдання попередження конфліктів повітряних кораблів (ПК) в реальному часі є одним з ключових серед проблем авіації, а отже потребує розроблення методів розв'язання та засобів для моделювання та тестування. В роботі проаналізовано переваги та недоліки чинної системи попередження конфліктних ситуацій TCAS II та норми ешелонування ПК згідно з рекомендаціями ICAO.

Розроблений комплекс для моделювання динамічних конфліктних ситуацій ПК у масштабі реального часу дає змогу оцінити кількісні показники симуляції руху ПК у згенерованому просторі та розглядати особливості вирішення конфліктних ситуацій. Чинна система TCAS застосовується вже більше 20-ти років та має деякі суттєві недоліки. Результати модельних експериментів показують, що розроблений комплекс коректно моделює переміщення, взаємодію та маневрування ПК, а експериментальна система розв'язання динамічних конфліктів є ефективнішою за чинну систему TCAS II за рядом показників.

Оцінювання ефективності функціонування розробленого комплексу моделювання та використовуваних алгоритмів виявлення і вирішення конфліктних ситуацій проводилася з використанням типових дослідних сценаріїв, починаючи від простих конфліктів між двома ПК до гранично складних за участі в одному конфлікті значної кількості ПК. Основними показниками ефективності розв'язання конфліктів прийнято вважати кількість та довжину маневрів уникнення конфліктної ситуації за різної завантаженості повітряного простору, за різних типів конфліктних ситуацій, пов'язаних з порушеннями норм ешелонування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Murugan S., Oblah A. TCAS functioning and enhancements. *International Journal of Computer Applications*. 2010. Feb; Vol. 1. Iss. 8. P. 46–50.
2. Spitzer, C., Ferrell, U., Ferrell, T., *Digital avionics handbook*. CRC press, 2017. 848 p.
3. Spitzer, C.R., *Avionics: Elements, software and functions*. CRC press, 2018. 448 p.
4. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1045-10>
5. Moir I., Seabridge A., Jukes M. *Civil avionics systems*. John Wiley & Sons, 2013. 602 p.
6. Banerjee S, Carlin BP, Gelfand AE. Hierarchical modeling and analysis for spatial data. CRC press; 2014 Sep 12. 584 p.
7. Fortune, S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. *Algorithmica*. 2, 153 (1987). P.313–322.
8. Волков О.Є., Павлова С.В. System of guaranteed resolution of dynamic conflicts of aircrafts in real time. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL AVIATION UNIVERSITY, 2017. № 1. С. 29–35.
9. Павлова С.В., Волков О.Є. Моделирование инвариантного метода разрешения динамических конфликтов воздушных судов. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. №53. С. 105–112.
10. Schäfer M., Olive X., Strohmeier M., et. al., "OpenSky Report 2019: Analysing TCAS in the Real World using Big Data," 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC), San Diego, CA, USA, 2019. P. 1–9.

11. Olive X. and Bieber P. Quantitative Assessments of Runway Excursion Precursors using Mode S data. *Proceedings of the International Conference for Research in Air Transportation*, 2018. P.8.

Отримано 20.05.2020

REFERENCES

1. Murugan S., Oblah A. "TCAS functioning and enhancements". *International Journal of Computer Applications*. 2010 Feb, Vol. 1, Iss. 8, pp. 46–50.
2. Spitzer C., Ferrell U, Ferrell T. Digital avionics handbook. CRC press, 2017, 848p.
3. Spitzer, C.R., Avionics: Elements, software and functions. CRC press, 2018, 448p.
4. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1045-10>
5. Moir I., Seabridge A., Jukes M. Civil avionics systems. JohnWiley&Sons, 2013, 602p.
6. Banerjee S, Carlin BP, Gelfand AE. Hierarchical modeling and analysis for spatial data. CRC press; 2014 Sep 12, p.584.
7. Fortune, S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. *Algorithmica*, 2, 153 (1987) pp.313–322.
8. Volkov O., Pavlova S. System of guaranteed resolution of dynamic conflicts of aircrafts in realtime. *Proceedings Of The National Aviation University: Scientific journal: scientific article*. Kyiv 2017. Iss. 1, pp. 29–35.
9. Pavlova S., Volkov O. Modeling in variant method dynamic resolution of conflicts of aircrafts. *Cybernetics and Systems Analysis*., 2017, Iss. 4, pp. 584-589.
10. Schäfer M., Olive X., Strohmeier M., Open Sky Report 2019: Analysing TCAS in the Real World using BigData. *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. SanDiego, CA, USA, 2019, pp. 1–9.
11. Olive X., Bieber P., Quantitative Assessments of Runway Excursion Precursors using Mode S data. *Proceedings of the International Conference for Research in Air Transportation*, 2018, p. 8

Received 20.05.2020

*Volkov O.Ye.,*

Head of the Intelligent Control Department

email: alexvolk@ukr.net ORCID: 0000-0002-5418-6723

*Pavlova S.V.,* DSc (Engineering), Associate Professor,

Chief Researcher of the Intelligent Control Department

email: dep185@irtc.org.ua ORCID: 0000-0003-4012-9821

*Simakhin V.M.,* PhD student,

Junior Researcher of the Intelligent Control Department

email: thevladsima@gmail.com ORCID: 0000-0003-4497-0925

*Semenog R.V.,* PhD student,

Junior Researcher of the Intelligent Control Department

email: dep185@irtc.org.ua ORCID: 0000-0002-6714-0644

International Research and Training Center for Information Technologies

and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine

40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

## COMPLEX FOR MODELING AIRCRAFTS' DYNAMIC CONFLICT SITUATIONS IN REAL-TIME

**Introduction.** Aircraft flight simulation has many solved and open tasks. The development of modern aviation is impossible without high-quality modeling tools, and every new proposed development must be thoroughly tested. Real-time aircraft conflict prevention is one of the key tasks in aviation, and therefore requires solutions and tools for modeling and testing.

**The purpose** of the paper is to provide brief information on identifying and resolving aircraft conflict situations methods, to develop a software package for modeling dynamic conflict situations in real-time.

**Methods.** Software development of complex is based on the statistical and simulation computer modeling, computational geometry and mathematical analysis methods. The theory of automatic control, navigation and intelligent control methods are used to identify and resolve conflict situations.

**Results.** The developed modeling complex allows evaluating the quantitative indicators of aircraft simulation in the generated space and examination the features of conflict situations resolution. Modeling of movement, interaction and maneuvering of the aircraft is carried out. In conflict resolution, the experimental system was more efficient than the current TCAS II system.

Testing the developed modeling complex, detecting and resolving conflict situations algorithms was performed using typical research scenarios, ranging from simple conflicts between two aircraft to extremely complex, involving a significant number of aircrafts in a single conflict. The main indicators for the optimal resolution of conflicts are the number and length of maneuvers to avoid a conflict situation with different airspace congestion, with different types of conflict situations associated with violations of the separation rules.

**Conclusions.** The proposed complex can be used to research the interaction of numerous aircrafts in a dynamic environment, the development and testing of conflict situations resolving methods. The modular structure of the complex allows performing simulations of other elements, such as data transmission systems.

**Keywords:** *information technology, aviation, computer simulation, conflict situation, aircraft, TCAS system.*